J3eA, Journal sur l'enseignement des sciences et technologies de l'information et des systèmes,
Volume 4, Hors-Série 2, 21 (2005)
DOI : http://dx.doi.org/10.1051/bib-j3ea:2005721
© EDP Sciences, 2005

Travaux pratiques supports de transmission en hyperfréquence : synthèse, réalisation et mesure d'un filtre passe-bas en technologie microruban

P.M. Martin [1], G. Tanné [1], E. Rius [1], D. Le Berre [1] et J.F. Favennec [2]

[1] Laboratoire LEST UMR CNRS 6165
Université de Bretagne Occidentale
IUP Télécom et Réseaux
Département Électronique, UFR Sciences
6 avenue Le Gorgeu, C.S. 93837
F-29238 Brest CEDEX 3, France

[2] Laboratoire LEST UMR CNRS 6165
Université de Bretagne Occidentale
École Nationale d'Ingénieurs de Brest (ENIB)
BP 30815
F-29608 Brest CEDEX, France

TRAVAUX PRATIQUES SUPPORTS DE TRANSMISSION EN HYPERFREQUENCE : SYNTHESE, REALISATION ET MESURE D'UN FILTRE PASSE-BAS EN TECHNOLOGIE MICRORUBAN

P. M. Martin*[+], G. Tanné[+], E. Rius[+], D. Le Berre[+], J. F. Favennec[++]
[+, ++] Laboratoire LEST UMR CNRS 6165, Université de Bretagne Occidentale
[+] IUP Télécom et Réseaux - Département Electronique, UFR Sciences
6, avenue le Gorgeu, C.S. 93837 - 29238 Brest Cedex 3.
[++] Ecole Nationale d'Ingénieurs de Brest (ENIB) B.P 30815-F-29608 BREST Cedex
* Pierre-Marie.Martin@univ-brest.fr

Résumé :
Dans le cadre de la création de l'IUP Télécommunications et Réseaux à Brest et en collaboration étroite avec le département Electronique de l'UFR Sciences, de nouveaux enseignements de Travaux Pratiques sur les supports de transmission en hyperfréquence ont été élaborés. Cette communication présente l'étude complète d'un filtre passif hyperfréquence passe-bas d'ordre 5, de type Tchebyscheff, en éléments localisés puis en éléments distribués. Une première partie théorique, nécessitant un certain nombre de calculs et de simulations sur un logiciel de CAO, est suivie d'une réalisation en technologie microruban, grâce à un système de gravure rapide, puis de mesures à l'analyseur de réseau vectoriel.

Mots clés : Travaux Pratiques, Filtre Passe-Bas, Hyperfréquence, Logiciel de Simulation, Machine à Graver, Technologie Microruban, Analyseur de Réseau.

1. INTRODUCTION

Les filtres sont des dispositifs qui sélectionnent, éliminent ou séparent des signaux dans des bandes de fréquences prédéfinies. Ils constituent donc des éléments fondamentaux dans de nombreux systèmes de transmission en radiofréquence et en hyperfréquence (radiomobiles, satellites, radars …).

Cette manipulation de Travaux Pratiques en DESS d'Electronique et en troisième année d'IUP Télécommunication et Réseaux permet aux étudiants d'approfondir leurs connaissances théoriques dans le domaine du filtrage hyperfréquence grâce au logiciel de simulation Agilent-ADS (Advanced Design System) [1]. Cet outil performant de conception de circuits microondes est largement utilisé dans l'industrie et dans les laboratoires de recherche. Après un premier travail de calculs théoriques et de simulations, les étudiants réalisent et mesurent un circuit au cours de la même manipulation. Ils sont alors confrontés à un des problèmes majeurs rencontrés en hyperfréquence : la comparaison entre théorie et mesure.

2. FILTRE EN ELEMENTS LOCALISES

Lors du travail préparatoire à la manipulation, les étudiants déterminent l'ordre et les valeurs des éléments localisés (inductances et capacités) d'un filtre passe-bas de type Tchebyscheff (figure 1), dont le gabarit en atténuation est imposé et présenté sur la figure 2.

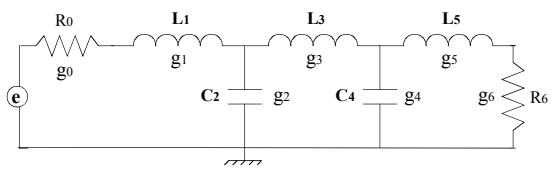

Figure 1 : Filtre passe-bas en éléments localisés : normalisés (g_i) ; dénormalisés (L_i , C_i , R_i)

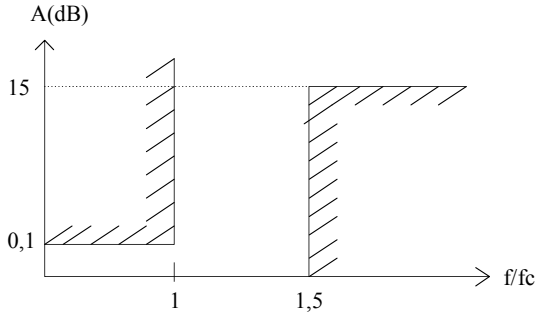

Figure 2 : Gabarit du filtre en atténuation avec f_c=1,5GHz.

Pour mener à bien leurs calculs, les étudiants disposent des caractéristiques de Tchebyscheff issues de la littérature (abaques et tableaux de g_i) [2]. Ils déterminent l'ordre minimal du filtre, en déduisent les valeurs des g_i et les dénormalisent avec les expressions suivantes :

$$Li=\frac{R_0\, g_i}{\omega_c} \quad , Ci=\frac{g_i}{R_0\, \omega_c} \quad \text{et} \quad R_6=R_0\, g_6$$

Ils obtiennent ainsi un schéma en éléments localisés (inductances et capacités) d'un filtre passe-bas en échelle coupant à la fréquence de coupure f_c= 1,5 GHz dans un environnement R_0=50 Ω. Ils vérifient ensuite leurs calculs théoriques par une simulation sur le logiciel ADS. L'exploitation de ces premiers résultats en termes de paramètres de répartition, en réflexion et en transmission (S_{11} et S_{21}), montre une très bonne concordance avec le cahier des charges proposé.

Cependant, une telle structure en éléments localisés est inadaptée en hyperfréquence du fait notamment des dimensions physiques des inductances et des capacités, qui ne sont plus négligeables devant la longueur d'onde.
On choisira donc de réaliser un filtre en éléments distribués constitué de tronçons de lignes de transmission de différentes impédances caractéristiques (Z_i) et longueurs électriques (θ_i).

3. FILTRE EN ELEMENTS DISTRIBUES

Les étudiants montrent au préalable comment synthétiser par une ligne de transmission courte ($\theta << 2\pi$) un élément localisé de type inductance série (figure 3) ou capacité parallèle (figure 4).

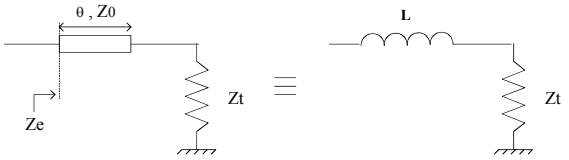

Figure 3 : Equivalence entre une ligne de transmission (Z_0 grande) et une inductance série

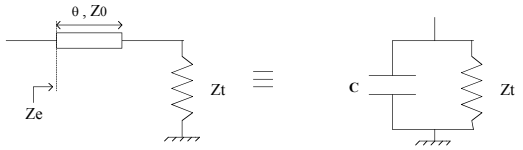

Figure 4 : Equivalence entre une ligne de transmission (Z_0 petite) et une capacité parallèle

Ces équivalences permettent alors de comprendre la configuration de la structure du filtre passe-bas d'ordre 5 en éléments distribués (figure 5) .

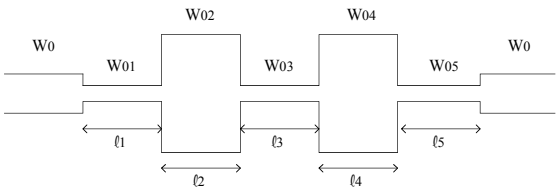

Figure 5 : Filtre passe-bas en éléments distribués : ℓ_i : longueurs des lignes, W_{0i} : largeurs des lignes

Nous choisissons de réaliser ce filtre en technologie microruban. A partir des caractéristiques principales du substrat utilisé (substrat diélectrique FR4, d'épaisseur h = 1,52 mm et de permittivité ε_r = 4,2) et des formules de synthèse en technologie microruban [3], les étudiants calculent les dimensions des lignes de transmission du filtre (largeurs et longueurs).

Les impédances caractéristiques des lignes inductives (Z_{0L}) et capacitives (Z_{0C}) sont fixées et plusieurs solutions sont proposées. Certains cas correspondent aux limites technologiques et ne sont pas toujours réalistes lorsqu'on passe à la phase réalisation. Il existe notamment des problèmes de discontinuités dus aux sauts d'impédance, entraînant parfois des effets parasites non pris en compte par la théorie. C'est pourquoi nous proposons d'autres solutions permettant d'atténuer ce phénomène en se rapprochant de cas plus réalistes.

A l'issue de l'ensemble des simulations sur le logiciel ADS, les étudiants mettent en évidence trois points fondamentaux :

- l'importance du domaine de validité des approximations faites à partir des schémas équivalents entre éléments localisés et éléments distribués.

- les difficultés à respecter en distribué le cahier des charges, sachant que les réponses idéales seront obtenues pour Z_{0L} la plus grande possible et Z_{0C} la plus petite possible.

- le problème des réponses harmoniques avec l'apparition de remontées parasites parfois gênantes pour un filtre passe-bas en éléments distribués, en fonction des valeurs de Z_{0L} et Z_{0C}.

Finalement, il s'agit de trouver le meilleur compromis possible entre le respect du cahier des charges et les contraintes de réalisation.

4. REALISATION DU FILTRE

En pratique, les étudiants réalisent leur filtre en technologie microruban sur une plaque diélectrique métallisée double-face de dimensions 3x8 cm^2. Le point de départ est le schéma électrique en distribué réalisé sous ADS (figure 6).

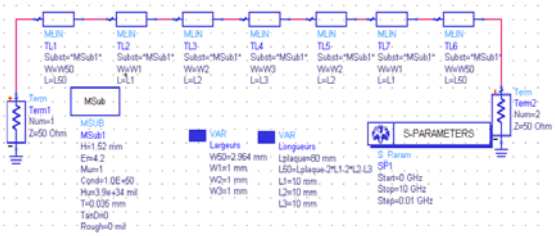

Figure 6 : Schéma électrique du filtre distribué sous ADS

Les étudiants ont préalablement déterminé les dimensions physiques du filtre et vérifié leurs calculs par une ou plusieurs simulations (cf paragraphe 3).

Grâce aux possibilités d'ADS, la génération du masque correspondant est très simple (figure 7).

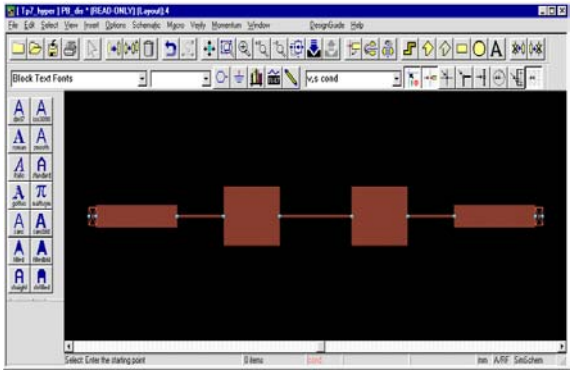

Figure 7 : Masque du filtre distribué sous ADS

Il suffit alors de l'exporter au format gerber et de le récupérer sous le logiciel ISOPRO fourni avec le graveur utilisé.
A ce niveau, un mode d'emploi détaillé aide les étudiants à adapter le masque, en vue de l'usinage du filtre sur la plaque de diélectrique.
Pour supprimer tout problème de positionnement et simplifier au maximum la phase d'usinage, nous avons mis au point une matrice dans laquelle nous insérerons la plaque à usiner (figure 8).

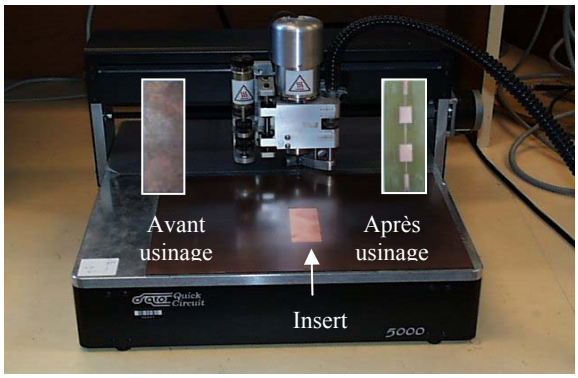

Figure 8 : Graveur et plaques

5. COMPARAISON ENTRE THEORIE ET MESURE

Une fois le filtre usiné, les étudiants ont à leur disposition un analyseur de réseau vectoriel leur permettant de le mesurer (figure 9). Pour des raisons de temps, la calibration de l'analyseur est déjà réalisée.

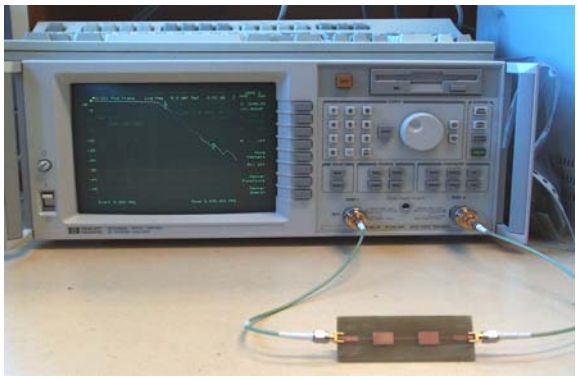

Figure 9 : Dispositif de mesure

A l'issue de cette mesure, ils doivent comparer les résultats simulés et mesurés (figure 10).

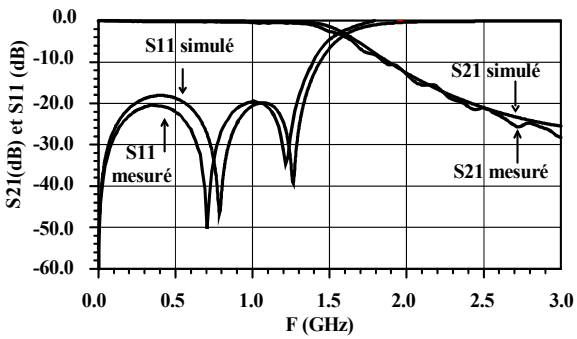

Figure 10 : Comparaison entre simulation et mesure

A ce niveau, il apparaît quelques différences majoritairement liées aux sauts d'impédance entre tronçons de lignes inductifs et capacitifs, qui ne sont pas pris en compte au cours des premières simulations. Cette comparaison permet de souligner l'importance d'inclure dès la conception les différentes discontinuités, auquel cas on retrouve un bien meilleur accord entre théorie et mesure

6. CONCLUSION

Cette manipulation permet aux étudiants de filières professionnalisées dans le secteur des télécoms, d'appliquer leurs connaissances théoriques sur un cas concret de synthèse de filtre hyperfréquence. L'utilisation de nombreux outils employés par l'industrie (logiciel de CAO, machine à graver, analyseur de réseau) constitue en outre un atout non négligeable pour la recherche de stage et d'emploi dans ce domaine de l'électronique.

Bibliographie

1. Agilent-ADS © URL http://www.agilent.com/

2. G.L. MATTHAEI, L. YOUNG, E.M.T. JONES "Micowave filters, impedance-matching networks, and coupling structures" Artech House, Dedham, pp 89,100 1980

3. E.O. HAMMERSTAD, "Equations for Microstrip Circuit Design" Conference Proceedings, 5th. Eu.M.C., Sept 75, Hamburg.